



# VU Research Portal

## Verkeersproblemen op de digitale snelweg

van der Mei, R.D.

2008

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

### **citation for published version (APA)**

van der Mei, R. D. (2008). *Verkeersproblemen op de digitale snelweg*.

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

### **E-mail address:**

[vuresearchportal.ub@vu.nl](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)



# Verkeersproblemen op de digitale snelweg

Prof.dr. R.D. van der Mei

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van bijzonder hoogleraar Prestatie Analyse van Communicatienetwerken bij de Faculteit der Exacte Wetenschappen van de Vrije Universiteit te Amsterdam op 10 juni 2004.

Mijnheer de Rector,  
Mijne Dames en Heren,

Het is precies 20 jaar geleden dat ik ben begonnen met studeren aan de Vrije Universiteit. Als je in gedachten terug gaat naar die tijd, dan realiseer je je pas hoeveel er op technologisch gebied veranderd is gedurende de laatste twee decennia. Ga maar na! Er was nog geen CD-speler, maar je had een platenspeler waarop je langspeelplaten en singletjes afspeelde. De meeste mensen hadden nog zwart-wit televisie. Er was nog geen PC of laptop. Verslagen en werkstukken schreef je met de hand of met een typemachine. Er was nog geen E-mail, maar je verstuurde berichten per post. Er was nog geen World Wide Web en als je informatie moest opzoeken ging je naar de bibliotheek. Er waren nog geen interactieve videospelletjes, maar je had gewoon PacMan. Er waren nog geen bankautomaten, maar geld haalde je contant op bij de bank. Er waren nog geen GSM-toestellen waarmee je kon SMS-en, maar je had gewoon een telefoon met een draaischijf.

En de komende jaren staat ons nog veel meer te wachten. Uw koelkast geeft aan wanneer uw melkvoorraad opraakt en geeft automatisch een bestelling door aan de supermarkt. Uw kleren zijn gelabeld met een chip. Uw wasmachine houdt in de gaten of uw wollen trui niet te heet gewassen wordt. U kunt elke videofilm naar keuze bekijken op ieder gewenst moment, u hoeft niet meer naar de videotheek. Uw digitale televisie werkt met spraakherkenning en u hoeft alleen maar de naam uit te spreken van de film die u wilt zien. U hoeft geen treinkaartje meer te kopen, maar de kosten worden automatisch van uw rekening afgeschreven via de chip in uw mobiele telefoontoestel. Uw badkamer herkent dat u 's morgens komt binnenlopen, geeft de weers- en verkeersvoorspelling, zet automatisch uw favoriete radiozender aan en zet de douche automatisch aan op uw favoriete temperatuur. Op uw interactieve televisie ziet u een documentaire over een aantrekkelijke vakantiebestemming. U kunt direct uw droomreis boeken via uw televisiescherm. Binnen een aantal jaren is dit allemaal realiteit.

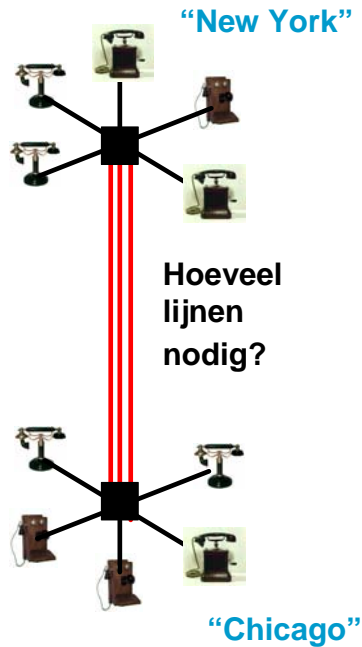
Deze voorbeelden laten zien dat het gebruik van telecommunicatiediensten de laatste twee decennia met een haast onvoorstelbare snelheid is toegenomen. Als gevolg daarvan moeten communicatienetwerken steeds grotere hoeveelheden, meestal digitale, informatie transporteren van de ene locatie naar de andere en komt er steeds meer verkeer op wat vaak de digitale snelweg wordt genoemd. Zodoende ontstaan er steeds vaker *Verkeersproblemen op de digitale snelweg*.

In veel opzichten lijkt het digitale wegennet op het gewone wegennet. Informatie die moet worden getransporteerd van de ene naar de andere locatie in het netwerk zoals stemgeluid, een document, een videofilm of een muziekbestand, wordt eerst gedigitaliseerd, in nullen en enen vertaald. Vervolgens wordt de digitale informatie als het ware door een gehaktmolen gehaald en in pakketjes gestopt. Die pakketjes worden dan als waren het vrachtwagentjes het netwerk ingestuurd. Bij de bestemming aangekomen worden de pakketjes weer uitgepakt en terugvertaald in stemgeluid, videobeelden, muziek, etcetera. U kunt zich dan voorstellen dat als het druk is op de digitale snelweg er verkeersproblemen, files en botsingen kunnen ontstaan, waardoor de digitale informatie te laat, beschadigd of helemaal niet op de plaats van bestemming aankomt. Om de essentie van het vakgebied duidelijk te maken zal ik eerst iets vertellen over de ontwikkelingen en doorbraken op het gebied van de telecommunicatie en de bijbehorende verkeersproblemen.

### **Geschiedenis van telecommunicatie en de geboorte van het vakgebied**

De eerste grote doorbraak is de ontdekking van de telefoon door de Amerikaan Graham Bell in 1877 die het mogelijk maakt spraakcommunicatie te realiseren via een elektrische verbinding. Al gauw blijkt elektronische spraakcommunicatie een doorslaand succes. De particulier kan nu ook van telecommunicatie gebruik maken en al snel begint de telefoon gemeengoed te worden onder de rijken. Er ontstaan lokale telefoonnetwerken die het mogelijk maken dat mensen binnen een stad of regio met elkaar kunnen telefoneren. Het doorschakelen van een nummer is nog niet geautomatiseerd: als persoon A wil telefoneren met persoon B, dan wordt op het zogenaamde switching center met de hand een schakeling aangebracht door de telefoonlijn van persoon A naar het switching center fysiek te verbinden met de lijn van het switching center naar persoon B. Niet veel later wordt het switchen geautomatiseerd.

Al snel ontstaat ook de behoefte aan interregionale telefonie en in 1892 wordt de eerste interregionale verbinding tussen New York en Chicago gerealiseerd.



Figuur 1. Het Erlang-blokkeringsmodel: “Hoeveel lijnen zijn er nodig?”

Al gauw ontstaan de eerste verkeersproblemen. Steeds vaker zijn alle interregionale lijnen bezet waardoor een interregionale gespreksaanvraag niet door kan gaan ofwel geblokkeerd wordt. De vraag rijst hoeveel lijnen je eigenlijk nodig hebt. Enerzijds is het aanleggen en onderhouden van interregionale telefoonlijnen zeer arbeidsintensief en dus duur, en is het aanleggen van te veel lijnen niet rendabel (zie Figuur 1). Anderzijds: als er te weinig lijnen worden aangelegd is de *blokkeringskans*, dat wil zeggen de kans dat een nieuwe interregionale gespreksaanvraag niet door kan gaan omdat alle lijnen bezet zijn, te hoog.

In 1917 verschijnt de eerste publicatie van de Deense wiskundige Agner Krarup Erlang, die het probleem oplost. Hij laat zien dat de blokkeringskans  $p$  onder bepaalde aannamen wordt gegeven door de volgende formule

$$p = \frac{\frac{(\lambda\beta)^N}{N!}}{1 + \frac{(\lambda\beta)^1}{1!} + \dots + \frac{(\lambda\beta)^N}{N!}},$$

waarbij  $\lambda$  het gemiddelde aantal gespreksaanvragen per tijdseenheid is,  $\beta$  de gemiddelde gespreksduur en  $N$  het aantal interregionale lijnen. Dit resultaat is in feite de geboorte van het vakgebied.

Vlak na de eeuwwisseling volgt de uitvinding van de radio. De radio blijkt een uitstekend medium voor het verspreiden van nieuwsberichten via de ether. Er ontstaat een enorme toestroom van nieuwe radiozenders. Het aantal radiotoestellen neemt dan ook snel toe en in de jaren 20 wordt de radio definitief gemeengoed. Een probleem dat al snel opduikt is interferentie: als verschillende radiozenders op dezelfde frequentie uitzenden interfereren de signalen met elkaar met als gevolg dat de ontvangst via het radiotoestel slecht is. *Verkeersproblemen op de radioweg*. Het probleem van interferentie wordt grotendeels opgelost door het instellen van licenties voor een radiozender waardoor radiozenders alleen op een gegeven frequentie mogen uitzenden.

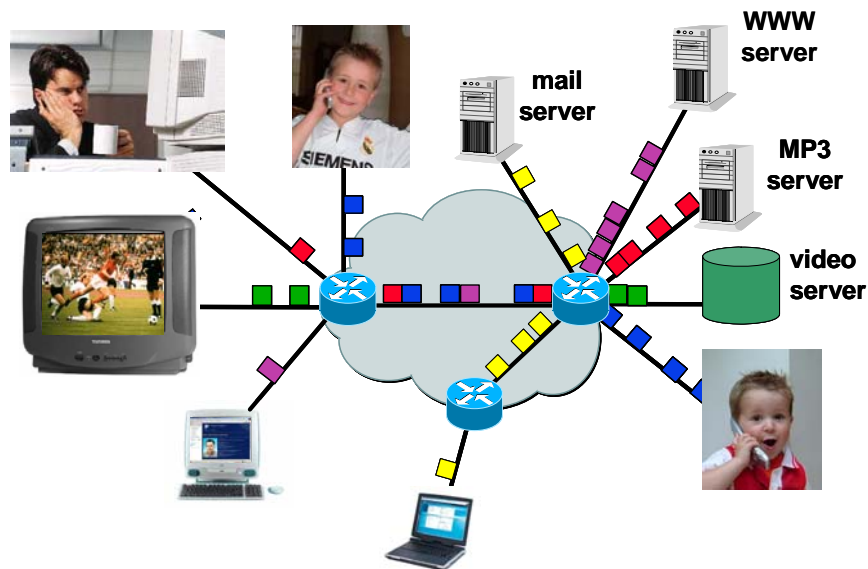
In 1927 wordt de elektronische zwart-wit televisie uitgevonden. De eerste televisieschermen waren slechts 13 centimeter in doorsnee maar nog te duur voor een grootscheepse uitrol. Het duurt tot na de Tweede Wereldoorlog voordat de zwart-wit televisie definitief in de huiskamer verschijnt. Pas in de jaren 70 doet de kleurentelevisie haar intrede.

In de jaren 40 komt ook de ontwikkeling van de computer op gang. De eerste echte computer is de Electronic Numerical Integrator and Calculator, de ENIAC. De ENIAC is zo groot als een kamer, weegt 30 ton en wordt geprogrammeerd door op verschillende manieren met de hand kabels op elkaar aan te sluiten. De volgende doorbraak is de uitvinding van de transistor in 1947, en dat vormt de basis voor de opkomst in de jaren 50 van zogenaamde mainframe computers die in grote instellingen zoals banken door veel gebruikers worden gedeeld. Gegevens worden op grote spoelen met magneetbanden opgeslagen. Vervolgens komt de microprocessor in 1971 die het mogelijk maakt complete elektronische schakelingen onder te brengen op één enkele chip, een stukje silicium zo klein als het puntje van je vinger. Een jaar later volgt de eerste microcomputer. In 1976 komt de eerste Apple PC op de markt. In 1981 komt IBM met de eerste Personal Computer. Al gauw volgt Apple in 1983 met de Macintosh met z'n grafische besturingssysteem. Pas jaren later in 1993 komt Microsoft met het Windows besturingssysteem dat we tot op de dag van vandaag op onze PC hebben staan. Voor insiders: de eerste PC had een kloksnelheid van 4,77 MHz en een geheugen van slechts 16 kilobytes.

Al snel ontstaat de behoefte om computers met elkaar te laten communiceren. Het bestaande telefoonnetwerk kan de wensen van computergebruikers niet meer aan. Zo ontstaan in de jaren 80 de eerste datanetwerken. De eerste toepassingen van datanetwerken zijn de giromaat en creditcards. Vervolgens zien we de opkomst van geïntegreerde netwerken waarin verschillende

applicaties over één en hetzelfde netwerk worden getransporteerd. Deze integratie wordt met name mogelijk gemaakt door de opkomst van het zogenaamde Internet Protocol (IP). Daardoor wordt het ook mogelijk multimedia applicaties te draaien, waarbij geluid, beeld en data tegelijk kunnen worden getransporteerd. De opkomst van het IP vormt de basis voor de doorbraak van het Internet aan het eind van de jaren 80 met als belangrijkste *killer*-applicaties het WWW en E-mail. Later komen er allerlei Internet-applicaties bij. Denk aan chatten, SMS-en, het spelen van interactieve videogames, het downloaden van muziek- en videobestanden en Internet-telefonie, toepassingen die de laatste tijd sterk in opkomst zijn.

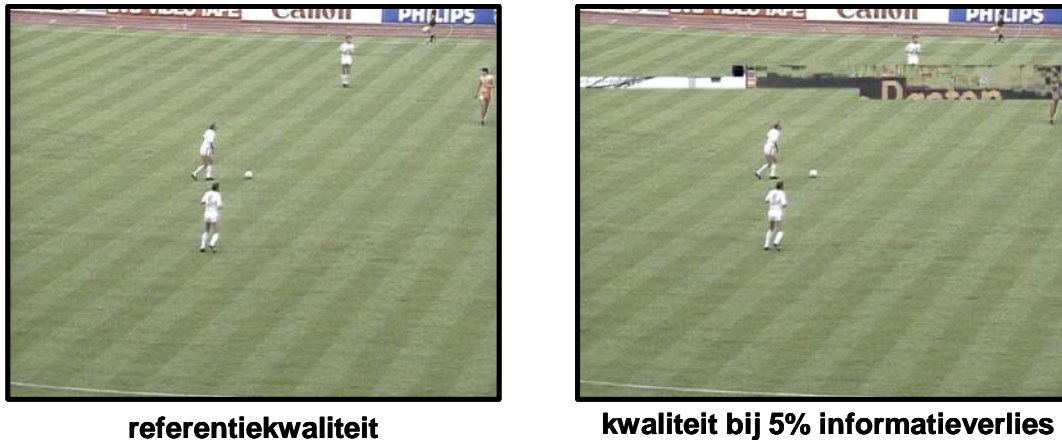
Maar al gauw wordt het Internet het slachtoffer van zijn eigen succes en ontstaan er enorme verkeersproblemen. Stel gebruiker A vraagt vanaf zijn PC een Webpagina op. Dan wordt een stroom pakketten gegenereerd van de Webserver naar de gebruiker. Gebruiker B haalt op hetzelfde moment een E-mail op hetgeen ook een stroom pakketten genereert via hetzelfde netwerk (zie Figuur 2). Als persoon C op datzelfde moment een muziekbestand aan het downloaden is, persoon D een video zit te bekijken, en broers T en M aan het telefoneren zijn kunt u wel nagaan dat er een heuse verkeerschaos en files op het netwerk kunnen ontstaan waardoor sommige pakketten veel te laat of soms helemaal niet op de juiste plek aankomen.



Figuur 2. Verkeerschaos op het Internet.

Maar wat merkt de eindgebruiker van die verkeersproblemen? Welnu, neem het volgende voorbeeld van een videofragment van de finale van de Europese Kampioenschappen voetbal in 1988 (zie Figuur 3). Op het linkerplaatje ziet u

de beeldkwaliteit wanneer er voldoende capaciteit op het netwerk is (de referentiekwaliteit). Op het rechterplaatje ziet u de beeldkwaliteit wanneer er te weinig capaciteit op het netwerk is waardoor 5% van de pakketten met digitale beeldinformatie verloren gaat.



Figuur 3. Kwaliteitsdegradatie als gevolg van informatieverlies.

De plaatjes maken duidelijk dat kwaliteitsdegradatie als gevolg van *Verkeersproblemen op de digitale snelweg* enorm kan zijn. En zo ontstaat er een interessant spel. Verschillende applicaties stellen verschillende eisen aan het netwerk. Bijvoorbeeld: een interactief telefoongesprek stelt zeer strenge eisen aan de vertraging op het netwerk en is minder gevoelig voor pakketverlies. Het downloaden van muziekbestanden daarentegen stelt veel minder strenge eisen aan de netwerkvertraging – een paar milliseconden meer of minder maakt immers niet zoveel uit – maar stelt strenge eisen aan pakketverlies dat tot een minimum beperkt moet blijven. De kunst is nu om het netwerkverkeer van de verschillende applicaties zódanig te reguleren dat ieder van de applicaties het gewenste kwaliteitsniveau haalt.

Daarnaast is er nog de opkomst van mobiele netwerken. De eerste grootschalige mobiele netwerken dateren uit de jaren 60. De grootste problemen zijn de beperkte hoeveelheid capaciteit en interferentie. Bij de eerste generatie mobiele netwerken heeft een zendmast een straal van 30 tot 80 kilometer en kan in zo'n gebied slechts een beperkt aantal mensen tegelijk telefoneren. Om een idee te geven: in de stad New York konden destijds slechts twaalf mensen tegelijk bellen! Mobiele communicatie komt in een stroomversnelling aan het eind van de jaren 70 door opkomst van cellulaire netwerken die gebruik maken van de mogelijkheid om frequentie te hergebruiken waardoor de capaciteit van de netwerken enorm toeneemt. De definitieve doorbraak van mobiele telefonie komt pas in de jaren 90 door de



opkomst van het digitale GSM-netwerk zoals we die anno 2004 ook nog kennen. Vervolgens ontstaat de behoefte aan mobiele datadiensten hetgeen leidt tot de opkomst in 2001 van de uitrol van GPRS-netwerken waarmee datacommunicatie mogelijk wordt met relatief lage snelheid via uw laptop of GPRS-toestel. Vandaag de dag zien we hier ook performanceproblemen omdat veel datadiensten niet gebouwd zijn voor mobiele netwerken en daardoor heel langzaam zijn. Dit jaar staat de uitrol van het mobiele UMTS-netwerk op de agenda. Via UMTS krijgt u supersnelle toegang tot het Internet, waarmee u kunt E-mailen, websurfen en toegang heeft tot uw bedrijfsnetwerk. Zo maakt UMTS het ook mogelijk mobiele multimedia-applicaties te draaien, zoals videofonie. Op dit moment zijn veel bedrijven bezig met het ontwikkelen van nieuwe en aantrekkelijke UMTS-diensten die u het leven aangenamer gaan maken. Uiteraard tegen betaling. Recentelijk zien we ook de opkomst van de draadloze WiFi-technologie waarmee u een supersnelle verbinding met het Internet heeft terwijl u in de tuin zit met uw laptop op schoot.

De doorbraak van het Internet maakt de weg vrij voor allerlei nieuwe ontwikkelingen. Door de opkomst van het World Wide Web krijgen zowel de consumenten als de dienstenleveranciers de smaak te pakken en ontstaan er allerlei nieuwe diensten, online-diensten, die gebruik maken van Internet-technologie. Veelgebruikte online-diensten zijn bijvoorbeeld het reserveren van hotels of vliegtickets via uw PC, het thuisbankieren en het spelen van interactieve games. Ook zien we de opkomst van zogenaamde peer-to-peer netwerken. Aan de wieg daarvan staat een middelbare scholier die in 1999 met zijn bedrijf Napster het mogelijk maakt muziekbestanden van over de hele wereld te downloaden via een centrale directoryserver. Op last van de rechter moet Napster zijn activiteiten staken in verband met copyrightproblemen: het kopiëren van muziek is immers illegaal. Maar het idee is geboren en al gauw weten bedrijven handig de wet te omzeilen. Zo ontstaan “echte” peer-to-peer netwerken die u in staat stellen bestanden te downloaden van de PC van iemand anders mits u de juiste software daarvoor hebt. Peer-to-peer netwerken danken hun populariteit voornamelijk aan de mogelijkheid van het downloaden van muziek via software pakketten zoals Gnutella, Kazaa en Bittorent. Recente verkeersmetingen hebben uitgewezen dat peer-to-peer applicaties vandaag de dag tezamen verantwoordelijk zijn voor meer dan de helft van het Internet-verkeer. Peer-to-peer netwerken genereren dus meer verkeer op het Internet dan het World Wide Web.

Vanuit veel toepassingsgebieden ontstaat de behoefte aan computers met een enorme hoeveelheid rekenkracht. Typische toepassingen die enorm veel rekenkracht vergen zijn bijvoorbeeld het doorrekenen van meteorologische

modellen voor weersvoorspellingen of van modellen om de gevolgen van de wereldwijde klimaatsveranderingen door te rekenen. Andere voorbeelden zijn toepassingen uit de hoek van de bio-informatica en de genomics of het geneesmiddelenonderzoek of het maken van MRI-scans. Voor dit soort applicaties is een enorme hoeveelheid rekenkracht nodig. Deze is vele malen groter dan de rekenkracht van uw PC of laptop. Deze vraag naar rekenkracht leidt tot de opkomst van het computational grid. Het idee daarachter is eigenlijk heel simpel: via het Internet zijn heel veel computers met elkaar verbonden die een groot deel van de tijd niets staan te doen. Het computational grid maakt gebruik van deze “slapende” computers voor het draaien van rekenkrachtige applicaties. Het computational grid wordt door velen daarom ook de volgende generatie World Wide Web genoemd.

### **Essentie van het vakgebied**

Wat is nu de essentie van het vakgebied? Welnu, typische vragen waar het vakgebied zich op richt zijn:

1. Stel ik bouw een communicatienetwerk. Hoeveel klanten kan het systeem dan maximaal aan zonder dat kwaliteit merkbaar slechter wordt? Dus, hoe kunnen we zoveel mogelijk betalende (!) klanten op het netwerk laten zonder dat de kwaliteit merkbaar afneemt?
2. Stel dat het aantal klanten snel stijgt. Hoe kunnen we het verkeer in het netwerk dan zodanig reguleren dat de kwaliteit van de netwerkdiensten goed blijft? Waar moeten we eventueel capaciteit bijplaatsen zoals zendmasten, extra apparatuur, extra transmissiecapaciteit? Hoeveel? En wanneer?
3. Omgekeerd, stel ik wil een netwerk bouwen en verwacht ruim 1 miljoen klanten. Hoe moet ik mijn netwerk bouwen en hoeveel capaciteit heb ik dan minimaal nodig om de gewenste kwaliteit daadwerkelijk te realiseren?

Bij het beantwoorden van dit soort vragen komt mijn vakgebied om de hoek kijken. Door middel van het verrichten van metingen en het ontwikkelen en analyseren van zogenaamde performancemodellen kan bijvoorbeeld worden uitgerekend hoe goed de verwachte kwaliteit van het netwerk is onder ieder hypothetisch groeiscenario. Of wat de impact op de kwaliteit is van het bijplaatsen van een aantal zendmasten. Of wat de invloed is van het implementeren van bepaalde *traffic management* technieken. Zo kun je als het ware vooruitkijken in de tijd om tijdig te anticiperen op capaciteitsproblemen. Op die manier kan worden voorkomen dat klanten ontevreden zijn. En dat is

essentieel voor het binnenhalen van nieuwe klanten en het behouden van de huidige klanten en daarmee voor het genereren van extra inkomsten om de investeringskosten terug te verdienen.

Een belangrijk aspect van het vakgebied is de rol van onzekerheid, ook wel *stochastiek* genoemd. Zo is van tevoren niet precies bekend hoeveel mensen in een bepaald tijdsinterval gaan bellen, wanneer ze dat precies gaan doen en hoe lang ieder van die gesprekken gaat duren. En dat terwijl de factor onzekerheid een enorme invloed kan hebben op hoe het verkeer in een communicatienetwerk afgehandeld moet worden. Het is dan ook verstandig om daar in het ontwerp van een communicatienetwerk rekening mee te houden. Om die reden ontwikkelen en bestuderen we meestal *stochastische modellen*, modellen waarin de factor onzekerheid expliciet is meegenomen.

Op zichzelf is het leveren van een goede kwaliteit van een netwerk eenvoudig. Door enorm veel capaciteit in het netwerk te plaatsen, we noemen dat overdimensioneren, is het leveren van kwaliteit een koud kunstje. Maar wel een duur kunstje!

Kort gezegd: de essentie van het vakgebied is het begrijpen van de relatie tussen aantal klanten, kwaliteit en capaciteit.

### **Industriële relevantie van het vakgebied**

Steeds meer bedrijven zijn afhankelijk van hun ICT-applicaties. Neem bijvoorbeeld een bedrijf als *amazon.com* dat je in staat stelt via het Internet boeken te bestellen. Voor zo'n bedrijf is het goed functioneren van het communicatienetwerk cruciaal: als het systeem een uur niet werkt, zijn er een uur lang geen verkoopinkomsten, nog afgezien van het feit dat klanten gefrustreerd raken en overlopen naar de concurrent. Of neem bijvoorbeeld KPN. KPN heeft een aantal jaren geleden enorm dure licenties aangeschaft voor het bouwen van een UMTS-netwerk. Omdat de licenties na enige tijd aflopen, moet dus in korte tijd de investering worden terugverdiend. Dus moet KPN zoveel mogelijk klanten zover zien te krijgen dat ze een UMTS-abonnement nemen. Kwaliteit speelt daarbij een heel belangrijke rol. Als het UMTS-netwerk een groot deel van de tijd “plat ligt”, of als het downloaden van informatie via het Internet uiteindelijk toch veel te lang duurt, dan krijgt UMTS al gauw een slechte naam, wordt de kans groot dat het geen commercieel succes wordt en wegen de opbrengsten dus niet op tegen de investeringskosten. Het is daarom essentieel dat de kwaliteit van het netwerk niet alleen goed maar ook voorspelbaar is. Nu zal dat normaal gesproken geen probleem zijn bij de

uitrol van het netwerk omdat er dan nog maar weinig klanten zijn. Maar wat gebeurt er als UMTS daadwerkelijk een doorslaand succes wordt, veel bedrijven op UMTS overgaan en iedere middelbare scholier een UMTS-abonnement neemt? Is de kwaliteit dan ook nog zo goed? Hoe zit het dan met de bedekkingsgraad van het netwerk? Hoeveel klanten kan het netwerk aan voordat het overbelast raakt? Wanneer moeten we zendmasten gaan bijplaatsen? En hoeveel dan? En waar kunnen we die dan het beste neerzetten?

Een ander voorbeeld: de kabelbedrijven. De kabelbedrijven bieden al langere tijd op kleine schaal digitale televisie aan via de kabel, maar de verwachting is dat digitale televisie de komende jaren definitief op grote schaal de huiskamer zal binnendringen. Digitale televisie levert een aanzienlijk hogere beeldkwaliteit op dan de huidige analoge televisie. De grootste kabelbedrijven bieden op dit moment al een digitaal pakket aan met enkele tientallen kanalen. Naar verwachting wordt de komende jaren de zogenaamde video-on-demand dienst via de digitale televisie aangeboden waarbij u op elk willekeurig moment een film naar keuze kunt laten afspelen. U hoeft dus niet meer naar de videotheek om een DVD of een video te huren. Omdat iedere gebruiker op elk gewenst moment een film of televisieprogramma kan opvragen zal er een enorme hoeveelheid extra transmissiecapaciteit nodig zijn. Dus als video-on-demand als nieuwe dienst daadwerkelijk *booming* is zal de capaciteit van het kabelnetwerk sterk moeten worden uitgebreid. De vraag is weer *hoeveel*, *waar* en *wanneer* de capaciteit moet worden uitgebreid. Deze vragen worden nog belangrijker doordat de minister wil dat de kabelaars hun netwerken openstellen voor concurrentie. Daarnaast hebben de kabelbedrijven ook nog eens te maken met de harde concurrentie van telecommunicatiebedrijven die televisiediensten via de telefoonlijn aanbieden.

Kortom: er ontstaat de komende jaren een keiharde strijd op de digitale televisiemarkt waarin geconcentreerd zal worden op prijs en kwaliteit. In deze context heb ik afgelopen jaar bij TNO Telecom met een aantal collega's modellen en technieken ontwikkeld voor de capaciteitsplanning van kabelbedrijven. In de zware concurrentiestrijd kan juist die kennis voor kabelbedrijven een enorm concurrentievoordeel opleveren!

Nog een voorbeeld: de medische sector. Medisch specialisten moeten gedetailleerde medische gegevens kunnen opvragen over een patiënt die per direct behandeld moet worden. Als zo'n systeem regelmatig overbelast is of niet werkt kan dat dramatische gevolgen hebben voor patiënten.

En ga zo maar door.

### **Wetenschappelijke relevantie van het vakgebied**

Maar wat is nu het wetenschappelijk belang van het vakgebied? Dat is niet zo moeilijk. Het vakgebied is per definitie gemotiveerd vanuit de toepassing. Het is dan ook interessant te zien dat de ontwikkeling van de techniek nieuwe wetenschappelijke uitdagingen als het ware vanzelf aandraagt. In veel gevallen roept deze ontwikkeling nieuwe fundamenteel-wetenschappelijke vragen op op het gebied van de stochastiek en geeft daarmee een enorme stimulans aan het wetenschappelijk onderzoek naar het gedrag van stochastische systemen.

Voorbeeld: als gevolg van de opkomst van pakketgeschakelde netwerken in de jaren 90 zoals het Internet is veel onderzoek verricht naar het karakteriseren en modelleren van netwerkverkeer. Op grond van gedetailleerde verkeersmeting is empirisch aangetoond dat het netwerkverkeer enkele intrigerende eigenschappen heeft die in de traditionele verkeersmodellen niet voorkomen. Voorbeelden van deze eigenschappen zijn het voorkomen van dikstaartige kansverdelingen, schaalinvariantie, waarbij de verkeerskarakteristieken over meerdere tijdsschalen min of meer dezelfde zijn, en long-range dependence, waarbij verkeerskarakteristieken sterke afhankelijkheden vertonen over langere tijdsperioden. Het bestaan van deze eigenschappen van het netwerkverkeer heeft enorme implicaties voor de performance van het netwerk en ook voor de manier waarop het verkeer in het netwerk gereguleerd moet worden. De vraag is hoe. Deze vraag is niet eenvoudig te beantwoorden en heeft geleid tot de ontwikkeling van allerlei nieuwe performancemodellen en analysetechnieken voor modellen met dikstaartige kansverdelingen, schaalinvariante en long-range dependent verkeerskarakteristieken. Deze ontwikkeling heeft recentelijk dan ook geleid tot een enorme hoeveelheid nieuwe inzichten in de prestatie van stochastische modellen die ook buiten de telecommunicatie van grote waarde blijken te zijn.

Een ander voorbeeld is de opkomst van de theorie van het simuleren van gebeurtenissen die slechts zeer zelden voorkomen, zogenaamde rare events, deels gemotiveerd door de doorbraak van de zogenaamde ATM-technologie in de jaren 90. Om een uitstekende netwerkqualiteit te kunnen leveren werden ATM-netwerken vaak dusdanig ingericht dat de kans dat een ATM-cel verloren ging zeer klein was, bijvoorbeeld 1 op de 1.000.000.000. Om dit soort extreme kwaliteitsgaranties te kunnen afleveren ontstond de behoefte aan simulatietechnieken die op efficiënte wijze zeldzame gebeurtenissen zoals celverlies konden simuleren. Inmiddels is de theorie van rare-event simulaties

volwassen geworden en worden rare-event simulatietechnieken ook op allerlei gebieden buiten de telecommunicatie toegepast.

Interessant is om te zien dat vaak het omgekeerde ook gebeurt: een bestaande “oude” theorie die in het verleden ontwikkeld is in een heel andere context of vanuit puur wetenschappelijke nieuwsgierigheid, blijkt min of meer toevallig bruikbaar te zijn voor het oplossen van nieuwe performancevraagstukken. Zo bleek bijvoorbeeld de theorie van hydrologische modellen van Mandelbrot in de jaren 60 ineens zeer bruikbaar voor het analyseren van modellen met long-range dependent verkeerskarakteristieken [1]. Een ander voorbeeld is Cohens elegante theorie van de zogenaamde Generalized Processor Sharing modellen [2]. Deze theorie, destijds ontwikkeld in een puur wachttijdtheoretische context, is recentelijk uitstekend toepasbaar gebleken voor het dimensioneren van Internet-verbindingen en het plannen van mobiele datanetwerken. Dit soort voorbeelden onderstreept nog eens het belang van fundamenteel onderzoek op het vakgebied.

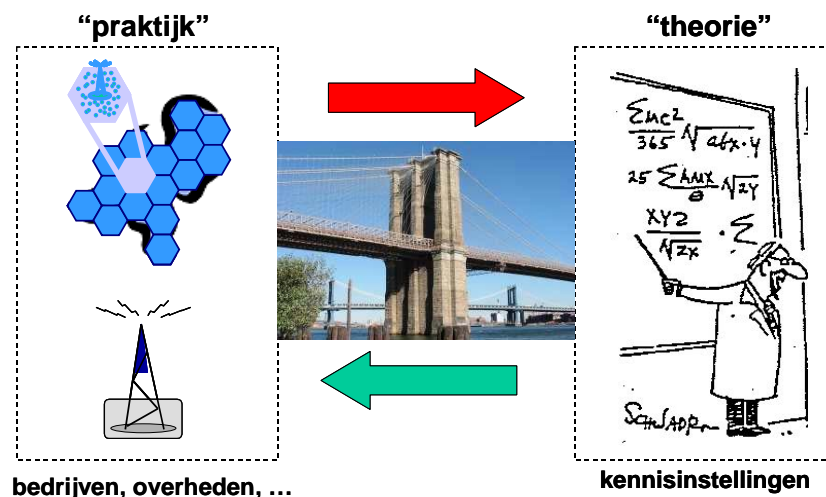
### **Brug tussen theorie en praktijk**

Het *gat tussen theorie en praktijk* is al jaren onderwerp van discussie. Enerzijds maken bedrijven niet of nauwelijks gebruik van de wetenschappelijke kennis en expertise, aanwezig op universiteiten en onderzoeksinstellingen. En anderzijds besteden wetenschappers relatief weinig aandacht aan de daadwerkelijke toepassing van hun onderzoeksresultaten. Hier ligt een kans: door het wetenschappelijk onderzoek en het gebruik van de onderzoeksresultaten veel beter op elkaar af te stemmen kan de Nederlandse kenniseconomie een enorme impuls krijgen. Op het eerste gezicht lijkt de oplossing simpel: laat bedrijven en universiteiten met elkaar praten, dan komen ze er vast wel uit. Maar zo werkt het helaas niet. Hoe komt dat toch?

Welnu, enerzijds zijn bedrijven zich vaak niet bewust van de meerwaarde die inbreng van universiteiten zou kunnen hebben. Ik ben door de jaren heen als consultant en onderzoeker voor AT&T, KPN en later TNO Telecom veel op pad geweest om projecten te acquireren. Vrijwel altijd is een potentiële opdrachtgever pas geïnteresseerd wanneer heel duidelijk is dat er veel geld verdiend dan wel bespaard kan worden door het financieren van een project. Return on investment. Het aantonen - dus feitelijk het verkopen - van de meerwaarde van de kennis is iets wat de meeste onderzoekers onvoldoende beheersen. Je hebt eigenlijk “schapen met vijf poten” nodig die enerzijds inhoudelijk hun mannetje staan maar anderzijds duidelijk aan een manager kunnen uitleggen wat de meerwaarde van hun wetenschappelijke kennis is.

Vaak speelt in deze context ook de tijdsdruk een belangrijke rol: problemen komen vaak pas aan de orde op het moment dat ze actueel zijn en er op zeer korte termijn - het liefst gisteren nog - een oplossing moet komen. En dat sluit vaak niet goed aan op de wat langere tijdslijnen van universitair onderzoek. Vaak wordt daarom voor een ad-hoc oplossing gekozen.

Omgekeerd zijn academische instellingen van oudsher niet gericht op de daadwerkelijke toepassing van hun onderzoeksresultaten. Academici worden nog steeds voornamelijk afgerekend op hun wetenschappelijke output en beperken zich vaak tot het publiceren van onderzoeksresultaten in wetenschappelijke tijdschriften, geschreven in een taal die alleen door vakbroeders begrepen wordt. Echter, de netwerkplanners, capaciteitsmanagers en architecten die deze resultaten zouden moeten toepassen kunnen die tijdschriften vaak helemaal niet lezen, laat staan dat ze er tijd voor hebben. Daar ligt dus een knelpunt, zeker ook vanuit de optiek van de overheid die hard roept dat de kenniseconomie zo belangrijk is voor de toekomst van Nederland.



Figuur 4. Brug tussen theorie en praktijk.

In deze context zie ik voor mijzelf en voor mijn leerstoel een rol weggelegd in het slaan van een brug tussen enerzijds de universiteiten en anderzijds het bedrijfsleven en de overheidsinstellingen. Op die brug moet meer verkeer komen in beide richtingen (zie Figuur 4). Om dat te realiseren ben ik naast het verrichten van fundamenteel onderzoek actief bezig relaties op te bouwen met industriële partners door middel van het initiëren van concrete samenwerkingsprojecten of afstudeerstages van studenten. Deze rol sluit ook nauw aan bij de beoogde rol van mijn voormalige werkgever TNO Telecom en

ik hoop de komende jaren dan ook de nauwe en vriendschappelijke banden met TNO Telecom te blijven onderhouden.

In mijn streven naar het realiseren van de brugfunctie sta ik niet alleen. Ook de overheid onderkent het belang van het nader bij elkaar brengen van industrie en academie. Ik juich de initiatieven vanuit de overheid voor het beschikbaar stellen van subsidies voor projecten waarin participatie van industriële partijen vereist is dan ook van harte toe. Naar mijn mening leveren dit soort initiatieven, gecombineerd met subsidieprogramma's die wel gericht zijn op fundamenteel onderzoek zoals het NWO-programma BRICKS een belangrijke bijdrage aan de versterking van de kenniseconomie in Nederland.

Ondanks het feit dat de regering hardop roept dat de kenniseconomie essentieel is voor de toekomst van Nederland wordt er *overall* tóch steeds meer bezuinigd op onderzoekssubsidies en worden stafplaatsen van vetrekkende hoogleraren niet opgevuld. In dat kader hoop ik van harte dat de overheid het belang van de kenniseconomie niet alleen onderschrijft in woorden maar ook in daden!

### **Onderwijs en popularisering van de Wiskunde**

Het instellen van deze leerstoel biedt een uitgelezen mogelijkheid om het imago van het vak Wiskunde te verbeteren. En dat is nodig ook, gezien de teruglopende studentenaantallen binnen de Exacte Wetenschappen in het algemeen, en de daaraan gekoppelde bezuinigingen.

In de eerste plaats bij middelbare scholieren. Terecht of niet, bij hen leeft onmiskenbaar de breed gedragen gedachte dat Wiskunde saai en theoretisch is, alleen geschikt is voor studiebollen en vooral buiten de werkelijkheid staat. Deze gedachte is wel begrijpelijk: het is voor een scholier überhaupt al niet zo duidelijk wat wiskundigen precies kunnen en als ze dan al in het nieuws komen wordt het geschetste beeld vaak bevestigd met krantenkoppen als “Wiskundigen vinden nieuw priemgetal met behulp van supercomputers” of “Wiskundigen vinden bewijs voor eeuwenoude stelling van Fermat”. Het is dus niet zo vreemd dat slechts weinig middelbare scholieren zich aangetrokken voelen tot de Wiskunde.

De beste manier om deze negatieve beeldvorming te veranderen is mijns inziens door aan de hand van sprekende voorbeelden te laten zien dat Wiskunde gewoon heel leuk en interessant is en daadwerkelijk toegepast kan worden om praktisch relevante problemen op te lossen. Middelbare scholieren



groeien vandaag de dag op met telecommunicatie, hebben een mobieltje, kunnen SMS-en, E-mailen, websurfen, chatten, muziek en films downloaden en interactieve spelletjes spelen. Zonder twijfel hebben ze zelf ook te maken gehad met performanceproblemen. Denk bijvoorbeeld aan het wegvallen van een mobiel telefoongesprek, het wachten op een Webpagina en de lange downloadtijden van muziek- en videobestanden.

In die context zie ik een duidelijke rol weggelegd voor mijn vakgebied. Doordat performanceproblemen naadloos passen binnen het referentiekader van een middelbare scholier, kun je door middel van eenvoudige en sprekende voorbeelden laten zien dat concrete problemen kunnen worden opgelost met behulp van vaak eenvoudige wiskundige technieken. Zelf heb ik de laatste jaren regelmatig populaire presentaties gehouden voor middelbare scholieren. De reacties zijn altijd positief. “Goh, ik wist niet dat Wiskunde zo leuk was!” en “Goh, ik wist niet dat je dat allemaal met Wiskunde kon!” Kortom, veel scholieren zijn wel degelijk enthousiast te krijgen voor Wiskunde en technische vakken, als je het maar op de juiste manier brengt!

De gedachte dat het centraal stellen van de toepassing van belang is om de interesse van middelbare scholieren en studenten te wekken wordt ondersteund door het succes van de opleiding Bedrijfswiskunde en Informatica (BWI) aan de VU die begin jaren 90 in het leven is geroepen. Toeval of niet, al jarenlang trekt BWI relatief veel studenten.

Een cruciale rol is ook weggelegd voor de wiskundeleraar. Hij of zij kan immers potentiële studenten enthousiast maken voor Wiskunde door uit te dragen dat Wiskunde een leuke, uitdagende en vooral ook toepasbare discipline is. Het probleem is echter dat wiskundeleraars zelf vaak niet goed op de hoogte zijn van het brede scala aan toepassingsmogelijkheden en het maatschappelijke belang van de Wiskunde. Bij de lerarenopleiding ligt de focus voornamelijk op de Wiskunde zelf en op didactische vaardigheden, maar blijft het aspect van de toepassingsmogelijkheden onderbelicht. Bijscholingscursussen voor leraren zijn veelal gericht op het verbeteren van didactische vaardigheden en zijn bovendien vrijblijvend van aard. Het gevolg van dit alles is dat te weinig leerlingen enthousiast worden gemaakt voor het vak Wiskunde. En dat zien we terug in de studentenaantallen.

Ook op universitair niveau zie ik een rol weggelegd voor onderwijs in mijn vakgebied. In het kader van de BaMa-structuur waarin universiteiten elkaar beconcurreren in het binnenhalen van studenten in de Master-fase is het voor de VU van groot belang hoogwaardige en aantrekkelijke vakken aan te bieden.

Op dit moment geef ik, samen met dr. Thilo Kielmann, Universitair Hoofddocent aan deze universiteit, een college “Performance Analyse voor Communicatienetwerken”. Het vak is een onderdeel van de Masters programma’s Bedrijfswiskunde en Informatica, Computersystemen, en vanaf komend najaar ook Econometrie. Het vak is er nadrukkelijk op gericht een brug te slaan tussen de theorie en de toepassing door de studenten te laten werken aan actuele en concrete problemen zoals die vandaag de dag in de telecommunicatiesector spelen. Als zodanig is het vak een interessante en aantrekkelijke aanvulling op de verschillende Master-programma’s aan de VU.

Daarnaast biedt de leerstoel de mogelijkheid om de relevantie van wiskundige modellerings- en oplossingstechnieken niet alleen over te brengen op scholieren, leraren en studenten, maar ook op professionals. In dat kader ben ik momenteel in samenwerking met ex-collega’s doctor Rob Kooij en professor Hans van den Berg bezig met het ontwikkelen van cursussen gericht op het bijscholen van professionals die in hun dagelijkse praktijk tegen performanceproblemen aanlopen.

Al dit soort initiatieven zijn naar mijn mening om twee redenen van belang. In de eerste plaats draagt de VU daarmee uit dat zij maatschappelijk betrokken is. In de tweede plaats draagt zij bij aan een positieve beeldvorming van het vak Wiskunde, en algemener, van Exacte Wetenschappen.

## **Onderzoek**

Gezien het zojuist gehouden betoog over de toepassingsgerichtheid van het vakgebied zal het u niet verbazen dat mijn onderzoeksagenda voor de komende jaren voor een belangrijk deel gemotiveerd is vanuit toekomstige ontwikkelingen in de telecommunicatiewereld. Het is daarbij van belang op te merken dat deze ontwikkelingen niet alleen vragen oproepen in de sfeer van toegepast onderzoek maar juist ook leiden tot interessante uitdagingen op het gebied van fundamenteel onderzoek. Beide komen in mijn plannen nadrukkelijk voor.

Laat ik beginnen met mijn plannen rond toegepast onderzoek. Aan het begin van dit betoog noemde ik een aantal voorbeelden van toepassingen die in de nabije toekomst gerealiseerd zullen worden. Dit soort toepassingen kunnen alleen worden gerealiseerd door het samengaan van Informatietechnologie (IT) en Communicatietechnologie (CT) waarin verschillende informatiesystemen aan elkaar gekoppeld zijn door middel van communicatietechnologie. Dit soort systemen worden daarom ook wel ICT-systemen genoemd.

Ik zie enorme uitdagingen in het onderzoek naar het realiseren van *end-to-end* performance van gedistribueerde ICT-systemen. Als gevolg van de zogenaamde ontbundeling van de telecommunicatiemarkt zullen de komende jaren steeds meer nieuwe diensten worden aangeboden die gebruik maken van andere diensten die worden beheerd door verschillende partijen, ieder met hun eigen financiële en strategische belangen. Neem bijvoorbeeld het bestellen van een goedkope vakantie via uw PC thuis. U typt het adres van de juiste Website op uw browser in, geeft aan waar u heen wilt en wanneer. Na een tijdje wachten verschijnen de goedkoopste aanbiedingen op uw scherm. U vraagt nog even of u een fotootje kunt zien van het uitzicht vanuit uw hotelkamer, u selecteert de meest geschikte reis, geeft uw creditcard nummer op en “klaar is Kees”. Achter de schermen zijn meerdere partijen bij deze dienst betrokken, zoals de service provider die u toegang verschaft tot het Internet, de service provider die voor u de goedkoopste reis selecteert, de content providers die de foto's beschikbaar maken en verschillende aanbiedingen van de luchtvaart-maatschappijen aanleveren.

Kortom: er speelt zich heel veel achter de schermen af en er zijn allerlei partijen bij betrokken. De eindgebruiker wil helemaal niet weten wat er allemaal achter de schermen gebeurt. Het enige wat de eindgebruiker interesseert is, naast natuurlijk het feit dat de reis niet te duur moet zijn, dat hij niet te lang hoeft te wachten om de gevraagde reisinformatie te krijgen en zijn reis te boeken. End-to-end performance dus.

Om een goede end-to-end kwaliteit van zo'n ingewikkelde ICT-dienst waarbij allerlei partijen betrokken zijn, te kunnen leveren is het essentieel dat de partijen kwaliteitsafspraken met elkaar maken, ook wel Service Level Agreements (SLA's) genoemd. Typische vragen zijn dan: “Hoe ga je end-to-end kwaliteit leveren op gebruikersniveau?”, “Welke SLA's moeten er worden gemaakt tussen welke partijen zodanig dat de door de eindgebruiker ervaren end-to-end kwaliteit aan de gestelde eisen voldoet?” en “Hoe kun je nagaan dat die afspraken ook worden nagekomen?” Het beantwoorden van dit soort vragen leidt tot allerlei uitdagingen, zoals bijvoorbeeld het ontwikkelen, valideren en analyseren van kwantitatieve performancemodellen, het ontwikkelen van een geschikte monitoring infrastructuur.

Daaraan gekoppeld is ook mijn interesse in het ontwerpen en analyseren van de performance van grootschalige softwaresystemen en –platformen gebaseerd op middleware-technologie, een gebied dat de laatste jaren sterk in opkomst is en interessante en belangrijke toepassingen heeft op allerlei gebied, zoals de

gezondheidszorg, het toerisme en de financiële wereld. In dat kader werk ik op dit moment samen met het CWI, de Universiteit Twente, TNO Telecom en een aantal industriële partners.

Andere uitdagingen zie ik in het ontwikkelen van robuuste grid-applicaties. In de context van het grid spelen veel onzekerheden een rol, bijvoorbeeld over beschikbaarheid van computers en netwerkverbindingen en hun snelheden die vaak variëren in de tijd. Vraag is: “Hoe ga je grid-applicaties ontwerpen, zodanig dat slim ze omgaan met fluctuaties en onzekerheden in de omgeving?” In dat kader werken we op dit moment nauw samen met de groep van professor Henri Bal van de afdeling Computersystemen aan de VU, een van de toonaangevende onderzoeksgroepen op dit gebied.

Maar ik zie nog veel meer uitdagingen gemotiveerd vanuit de toepassing, zoals het gebruik van evolutionaire algoritmen voor het oplossen van complexe planningssvraagstukken in telecommunicatienetwerken waar de traditionele oplossings technieken in veel gevallen niet bruikbaar blijken. Recente publicaties op dit gebied zijn dan ook zeer hoopgevend. In dat kader bereid ik een samenwerking voor met de groep van professor Gusztai Eiben aan de VU, een toonaangevende groep op het gebied van evolutionaire algoritmen.

Een ander uitdagend toepassingsgebied is de opkomst van interactieve games, spelletjes via het Internet. De gaming-industrie heeft de laatste paar jaren een enorme vlucht genomen. Eén van de problemen waar men steeds vaker tegenaan loopt is de responstijd-performance van interactieve games met heel veel spelers. In veel gevallen zijn de responstijden veel te lang terwijl deze voor interactieve spellen juist minimaal moeten zijn. Op dit moment bereid ik activiteiten voor op het gebied van performanceanalyse van interactieve games in samenwerking met het CWI, de Technische Universiteit Eindhoven en een aantal industriële partijen en overheidsinstellingen.

Daarnaast heeft de opkomst van mobiele netwerktechnologie de weg vrijgemaakt voor een aantal doorbraken in de gezondheidszorg. Bijvoorbeeld: door middel van het aanbrengen van draadloze sensoren op het lichaam van bijvoorbeeld epilepsie- of astmapatiënten of hoogzwangere vrouwen, kan de toestand van de patiënt continu worden gemeten. Zo zullen patiënten die nu uit voorzorg in het ziekenhuis moeten blijven gewoon straks gewoon naar huis kunnen. Door middel van die sensoren kan de toestand van de patiënt op afstand bijgehouden worden en kan direct worden ingegrepen wanneer acute hulp nodig is. Soortgelijke toepassingen gaan in de toekomst ook een belangrijke rol spelen in de thuiszorg. Het zal duidelijk zijn dat de kwaliteit en

de beschikbaarheid van dit soort diensten een cruciale rol spelen, en dat daarmee mensenlevens gered kunnen worden. Op dit moment bereid ik activiteiten voor op het gebied van de performance van diensten in de gezondheidszorg in samenwerking met de Universiteit Twente.

Ook aan de fundamentele kant van het vakgebied zie ik veel onderzoeksuitdagingen. In de eerste plaats kunnen performancevraagstukken in gedistribueerde ICT-systemen vaak worden vertaald in termen van verblijftijden in netwerken van wachtrijen hetgeen leidt tot fundamentele vragen rond het doorgronden en voorspellen van verblijftijden in netwerken van wachtrijen. Met dit onderwerp ben ik langere tijd bezig in samenwerking met CWI, TNO Telecom en recentelijk ook de Technische Universiteit Eindhoven en de Universiteit van Tilburg.

Daarnaast is het vakgebied traditioneel voornamelijk gericht geweest op CT, en in mindere mate op IT. Door het toenemend belang van ICT-systemen waarin de complexiteit van de CT- en IT-systemen gecombineerd wordt ontstaan er nieuwe uitdagingen op het gebied van het ontwikkelen van performance-modellen voor dit soort ICT-systemen. In samenwerking met TNO heb ik op dat gebied jaren gewerkt aan de ontwikkeling van PerfICT<sup>TM</sup>, een generiek model met een hiërarchische structuur dat uitstekend blijkt te werken voor het modelleren van kwaliteit van ICT-systemen. Die hiërarchische structuur van dit soort modellen leidt op zijn beurt weer tot een nieuwe en uiterst interessante klasse van wachtrijmodellen. Het onderzoek naar het gedrag van deze gelaagde wachtrijmodellen staat nog in de kinderschoenen. Op dit moment werk ik op dit gebied samen met het CWI, TNO Telecom, de Universiteit van Amsterdam en recentelijk ook de Universiteit van Twente en de Technische Universiteit Eindhoven. Ik heb hoge verwachtingen van dit onderzoek in de komende jaren.

Met dit betoog hoop ik u duidelijk gemaakt te hebben dat dit een prachtig vakgebied is met een enorme wetenschappelijke uitdaging én maatschappelijke relevantie dat uitgelezen mogelijkheden biedt voor de popularisering van het vak Wiskunde en van Exacte Wetenschappen.

Ik ga d'r wat moois van maken!

## **Dankwoord**

Tot slot. Bij verkeersproblemen horen ook oplossingen. Veel mensen hebben me bij het zoeken naar en soms vinden van die oplossingen in het bijzonder geholpen. Een aantal mensen wil ik in het bijzonder bedanken.

Hooggeleerde Koole, beste Ger. Na jarenlang werkzaam te zijn geweest als consultant in de telecommunicatie-industrie begon ik het wetenschappelijk onderzoek en het lesgeven aan studenten steeds meer te missen. Daarom besloot ik vier jaar geleden de stoute schoenen maar eens aan te trekken met de vraag “of ik iets voor de VU zou kunnen betekenen”. En vandaag staan we hier. Binnen jouw OBP-groep voel ik me als een vis in het water. Je hebt je nek voor me uitgestoken en ik ben je daarvoor veel dank verschuldigd.

Ik dank het College van Bestuur, het bestuur van de Stichting Het Vrije Universiteitsfonds, het bestuur van de Faculteit Exacte Wetenschappen en de afdeling Wiskunde voor het vertrouwen dat zij middels deze benoeming in mij hebben uitgesproken.

Hooggeleerde Boxma, beste Onno. Na mijn afstuderen in 1990 heb je me, samen met de zeergeleerde Hans Blanc, de kans gegeven een promotieonderzoek te verrichten op het gebied van de wachtrijanalyse. Op dat moment kon ik nog niet vermoeden dat dit een uitstekende opstap was naar de telecommunicatiewereld waar de wachtrijproblematiek nadrukkelijk opspeelde door de opkomst van datacommunicatie en het Internet. Naar mijn mening ben jij er in belangrijke mate voor verantwoordelijk dat Nederland op ons vakgebied internationaal aanzien geniet.

Hooggeleerde Van den Berg, beste Hans. Als collega's bij KPN Research en later TNO Telecom hebben we ons altijd lotgenoten gevoeld. In de tijden dat de broekriem aangehaald moest worden is ons beider drijfveer uiteindelijk toch altijd de wetenschappelijke uitdaging op ons vakgebied geweest. Ik weet zeker dat we in de toekomst nog veel zullen blijven samenwerken.

Welgeleerde Gijsen, beste Bart. Na mijn terugkomst uit de Verenigde Staten in 1999 zijn we, samen met Marco Blom, gaan werken aan de opbouw van een nieuw kennisgebied, onder de naam ICT Performance. Jij hebt daarin zonder meer een sleutelrol gespeeld, zowel bij de acquisitie van projecten voor interne en externe klanten als het realiseren van wetenschappelijke output. De laatste jaren hadden we zo'n beetje een duo-baan: samen formules kraken op het schoolbord, samen brainstormen over de toekomst, samen afstudeerders

begeleiden, samen naar de directie, samen op acquisitiepad en vooral samen veel plezier.

Zeergeleerde Kooij, beste Rob. Al vrij snel na mijn terugkomst bij KPN Research hebben we elkaar gevonden op een terrein dat ons beiden, naast het voetbal, na aan het hart ligt: het populariseren van ons vakgebied, Natuur & Techniek, het geven van gastcolleges, cursussen voor professionals en onze plannen over onze roadshow langs middelbare scholen. Ook ben je voor mij altijd een soort klankbord en je advies is steeds “volg je hart”. Ook wil ik jou, samen met Marco Blom, hartelijk danken voor je hulp bij het maken en bewerken van de onvergetelijke videobeelden van Marco van Basten.

Ik ben ook veel dank verschuldigd aan de de KPN-directeuren Victor Elsendoorn en Rob Langezaal en aan mijn manager Paul de Jager voor hun ondersteuning tijdens het benoemingstraject.

Ondanks de woelige tijden en reorganisaties bij KPN Research en later TNO Telecom heb ik altijd gevoeld dat ik er thuis was. Eerst bij de afdeling PPR, vervolgens Network Planning, en in de Pippi-tijd bij de “Hot Spot”, bij de Expertise Group, toen bij MicroTel en later nog bij het KIC. TNO Telecom heeft me de ruimte gegeven om me als consultant en wetenschapper te ontwikkelen en verder te ontplooien. Ik dank alle TNO-collega's en wel in het bijzonder de mannen van het KIC en de collega's van het BIT BNO voor de geweldige en leerzame tijd die ik er heb gehad.

Ik dank mijn oud-collega's van AT&T Labs voor de onvergetelijke en op alle fronten leerzame tijd in New York.

Ik dank de hooggeleerde Michel Mandjes, Lex Schrijver en Jan Karel Lenstra voor het vertrouwen dat zij mij hebben gegeven door middel van mijn aanstelling aan het Centrum voor Wiskunde en Informatica. Ik zie het als een enorme uitdaging om de komende jaren de PNA2-groep verder uit te bouwen en naast het verrichten van wetenschappelijk onderzoek een sleutelrol te vervullen in het realiseren van een brugfunctie tussen de theorie en de toepassing.

Lieve moes, beste vader. Jullie vertrouwen in mij is altijd onvoorwaardelijk geweest. Ik kan er veel over zeggen, maar het belangrijkste is dat ik weet dat in de Eemsstraat de deur altijd voor me openstaat.

Lieve Tien. We zijn negen jaar geleden met z'n tweeën op weg naar New York gegaan, kwamen met z'n drieën terug, en inmiddels zijn we met z'n vieren en hebben we twee voetballende aapjes. We zijn trots op elkaar en voelen elkaar goed aan, juist omdat we in ons hart allebei wetenschapper zijn.

Ik heb gezegd.



## **Literatuur**

- [1] B.B. Mandelbrot en J.W. van Ness (1968). Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. SIAM Review 10, 422 – 437.
- [2] J.W. Cohen (1979). The multiple phase service network with generalized processor sharing. Acta Informatica 12, 245-284.